

AZO/N⁺-Si 欧姆接触的研究

杨 倩, 陈 朝

(厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 文章介绍了 AZO/N⁺-Si 欧姆接触特性的研究和 AZO/N⁺-Si 欧姆接触的制备新方法。实验发现 AZO/N⁺-Si 的退火温度和时间对其欧姆接触特性有很大的影响, 在最优的退火温度和时间条件下, 测得最小比接触电阻为 $7.32 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。它满足多晶硅太阳能电池的要求, 可用于高效率硅太阳能电池透明电极的制备。

关键词: 多晶硅片; AZO; 比接触电阻

中图分类号: TN304.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2011)03-0386-03

Study on Ohmic Contact of AZO/N⁺-Si

YANG Qian, CHEN Chao

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN)

Abstract: The fabrication method and electrical characteristics of AZO/N⁺-Si (polycrystalline silicon) contact are presented. For AZO/N⁺-Si contact system, the optimal fabrication conditions for Ohmic contact are obtained, and the minimum specific contact resistance is tested to be $7.32 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$, which can satisfy the performance requirements of devices and can be used for the fabrication of transparent electrodes in high efficiency silicon solar cells.

Key words: polycrystalline silicon; AZO; specific contact resistance

0 引言

氧化锌(ZnO)薄膜具有高透过率和高导电率, 掺杂或退火能提高 ZnO 薄膜的电学和光学性能。ZnO 掺铝(AZO)后根据 Burstein Moss 效应会引起吸收带边蓝移, 提高近紫外的透过率并大大提高其导电性能^[1-2]。同时, AZO 使得可见光平均透光率达到 90% 以上, 这可以满足大多数光电领域透明电极应用要求^[3]。退火能改善光透过率、电导率和晶体结构。由于 AZO 具有低电阻率和可见光高透过率, 加上其原材料丰富, 价格低廉且无污染, 成为主要的透明电极材料之一。

目前冶金法生产的低成本多晶硅太阳能电池成为硅晶体太阳能电池发展趋势^[4], 但低成本多晶硅

太阳能电池效率还不够高。所以希望能将 AZO 用在多晶硅太阳能电池中做透明电极, 来提高光的透过率, 从而提高太阳能电池的效率。

目前对 AZO 薄膜透明电极的研究主要集中在非晶硅太阳电池^[5-6]、CIGS 太阳电池^[7]和异质结太阳电池^[8]。能否将 AZO 做成晶体硅太阳电池的透明电极, 最重要的是制作出比接触电阻低、可靠性良好的高质量欧姆接触。半导体器件的电学性能和稳定性变差的主要原因之一是半导体材料和金属界面接触处存在较大的电压降。器件正常工作要求良好的欧姆接触, 如果接触电阻率太大, 则会使正向电压增大、发热、无用功耗增大, 那么性能就会降低。如果欧姆接触没有做好, 可能形成的肖特基接触就会大大降低器件性能。目前生产的硅太阳电池都是 N⁺/P 的结构, 所以, 实现 AZO 与 N 型多晶硅的低阻欧姆接触是进一步提高太阳能电池效率的基础。要做好 AZO/N⁺型多晶硅太阳电池必须满足良好的

收稿日期: 2010-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61076056); 福建省科技厅 2007 年重大专项资助项目(2007ZH005-2).

欧姆接触(即 $I-V$ 曲线是线性)和低的比接触电阻两个条件。

比接触电阻 ρ_c 是表征金属与半导体欧姆接触性能的重要参数。测量 ρ_c 的方法很多,常用的方法是传输线(TLM)法^[9],但它须经过台面刻蚀。此方法计算过程简单,具有光刻工艺条件下可采用此模型。

本文用 TLM 方法测量了 AZO/N⁺ 型多晶硅接触在不同退火温度和退火时间下的 $I-V$ 特性,从而在最佳退火温度和时间下获得 AZO/N⁺ 型多晶硅接触的 ρ_c 值。

1 实验

1.1 实验步骤

整个实验过程采用以下步骤进行:

(1) 将电阻率为 $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右的 P 型冶金法多晶硅片,用常规太阳能电池制备标准工艺进行腐蚀清洗后,以三氯氧磷(POCl_3)为源在 900°C 下扩磷 5 min,然后用氢氟酸腐蚀去表面的磷硅玻璃层,用 SZT-2000 四探针测试仪测方块电阻。扩磷工艺应控制方块电阻在 $10 \sim 40 \Omega/\square$ 。

(2) 在扩磷后多晶硅片的 N 型层上用常规工艺光刻出 TLM 图形。

(3) 在样品上用磁控溅射仪生长厚度约为 150 nm 的 AZO 薄膜。靶材为国产 $\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷靶(ZnO 纯度为 99.99%), Al_2O_3 的掺杂量为 2.0 wt%。

(4) 将样品浸泡在丙酮中,用棉球轻擦剥离光刻胶。

(5) 用 L451300-4 型 / QXG 扩散炉在氮气保护下进行不同温度和时间下的退火。

(6) 用 Keithley 2410 电源表和 Keithley 6514 静电计测试不同间距的长方形电极间的总电阻,再按公式(1)和(2)计算出比接触电阻。用 TLM 法测量的电极制备工艺流程如图 1 所示。

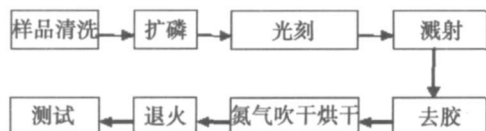


图 1 CTLM 电极制备流程

1.2 实验原理

本文采用线形传输线模型(TLM),测量用的图案由一系列长方形接触图案组成,每一个长方形接

触图案大小为 $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,其间距依次为 240、120、60 和 $30 \mu\text{m}$,如图 2 所示。文献[9]对这种模型进行了较为详细的论述,图 3 是电流通过一个接触区域的流向分布。根据传输线理论模型的等效电路可推算得

$$R_{\text{tot}}(l_n) = R_s \frac{l_n}{W} + 2R_c \quad (1)$$

其中, R_s 为半导体的薄层电阻, R_c 为总接触电阻, l_n 是接触的间距, W 是电极长度, $R_{\text{tot}}(l_n)$ 为测量出的不同间距的长方形电极间的总电阻。公式(1)是 $R_{\text{tot}}(l_n)$ 随测量电极的间隔长度 l_n 变化的直线方程,从直线的斜率和截距上,分别可以得到 R_s 和 R_c ,最后再代入公式(2)可求出 ρ_c :

$$\rho_c = (R_c W)^2 / R_s \quad (2)$$

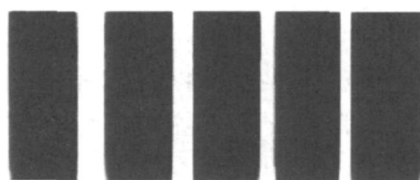


图 2 TLM 光刻版图

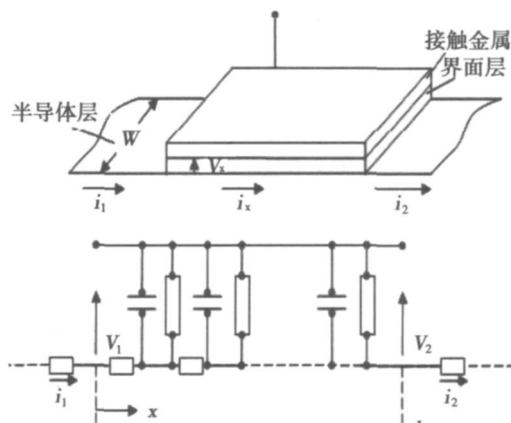


图 3 流过接触区域的电流分布

2 实验结果与分析

2.1 退火温度对 AZO 比接触电阻的影响

为了改善 AZO/N⁺-Si 的欧姆接触性能,本文在氮气氛围中对 AZO 薄膜进行不同时间和温度的退火实验,以获得低的比接触电阻和高光透过率的 AZO 薄膜的条件。按照图 1 的实验步骤进行电极的制备,在 N_2 流量为 0.7 L/min 、不同温度下退火 5 min,测试 $I-V$ 并计算其比接触电阻,如图 4 所示。

在 AZO/N⁺-Si 结构中,因为 ZnO 和 Si 都是重掺杂的,同型异质结两侧杂质浓度都很大,势垒区很薄。根据量子力学的隧道效应,在 AZO/N⁺-Si 结

构两端施加电压后就会产生隧道电流, 能量低于势垒顶的电子有一定的几率穿过势垒, 穿透几率与电子能量和势垒厚度有关。因为 N 型多晶硅是重掺杂, 所以是靠电子的隧穿效应, 公式 (3) 是比接触电阻 ρ_c 和势垒高度 ϕ_b 、掺杂浓度 N 的关系^[10]。

$$\rho_c \propto \exp[\phi_b / \sqrt{N}] \quad (3)$$

由公式 (3) 可以看出为了获得低 ρ 值, 必须要求具有高掺杂浓度和低势垒高度。根据参考文献[12] 可以画出 AZO 即 N-ZnO 在 N 型晶体硅上的能带图, 如图 5 所示, 其中下标 1 为 Si, 下标 2 为 AZO, 从能带图中可以看出理论上同型异质结导带差为

$$\Delta E_c = \chi(\text{Si}) - \chi(\text{ZnO}) \quad (4)$$

其中, $\chi(\text{Si})$ 和 $\chi(\text{ZnO})$ 分别代表 Si 和 ZnO 的电子亲和能, 其数值分别为 4.05 eV 和 4.35 eV, 可以算出 $\Delta E_c = -0.30$ eV, 即低势垒高度。另外, 在 ZnO 中掺入 Al^{3+} , Al^{3+} 在 Zn^{2+} 格点上形成替位式掺杂。N 型多晶硅是重掺杂, 其掺杂浓度可达到 $1.019 \sim 1.020 \text{ cm}^{-3}$ 。在适当的退火温度下, 形成良好的欧姆接触并得到较低的比接触电阻。由图 4 可知, 当温度较低时(小于 550 °C) AZO 薄膜的比接触电阻随退火温度的升高而迅速降低; 在 550 °C 时, 比接触电阻达到最小, 约为 $1.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

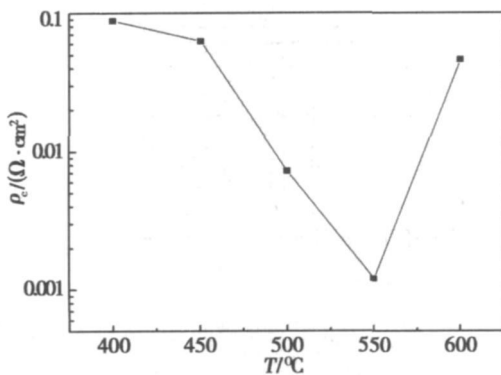


图 4 退火温度对比接触电阻的影响

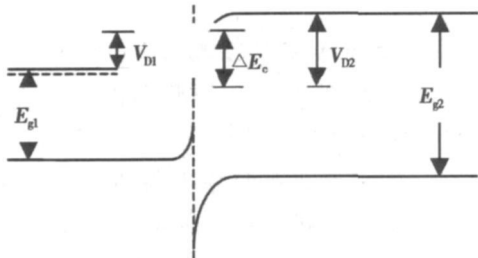


图 5 AZO/N⁺-Si 的能带图

温度升高有利于 AZO 薄膜和硅片晶格之间的融合, 使比接触电阻下降。但是太高的温度将使 AZO 薄膜中的 O 与掺杂的 Al 结合, 使 Al 杂质载

流子浓度和迁移率降低, 导致电学性能下降, 比接触电阻上升。

2.2 退火时间对 AZO 比接触电阻的影响

实验发现 AZO 在 N₂ 氛围中的退火时间对其比接触电阻的影响很大。将多晶硅电池片按照图 1 中的实验步骤, 在 N₂ 流量为 0.7 L/min, 温度为 550 °C 下退火不同时间, 测量 I-V 特性再计算其比接触电阻, 结果如图 6 所示。

用磁控溅射法生长 ZnO 速率较快, 但生长的 AZO 薄膜中存在较多的点缺陷, 如氧空位、锌填隙、氧填隙等。这些缺陷在 ZnO 禁带中引入缺陷能级, 起施主或受主的作用, 使得 AZO 薄膜的电学性能不稳定。另外, 原位生长的 AZO 薄膜中存在有比较大的内应力。所以在未退火和退火温度过低时 AZO/N⁺-Si 接触表现出整流特性。适当的退火有助于 AZO 薄膜晶体结构的改善, 降低薄膜中的缺陷数量, 同时降低接触势垒的高度和宽度, 形成良好的欧姆接触。

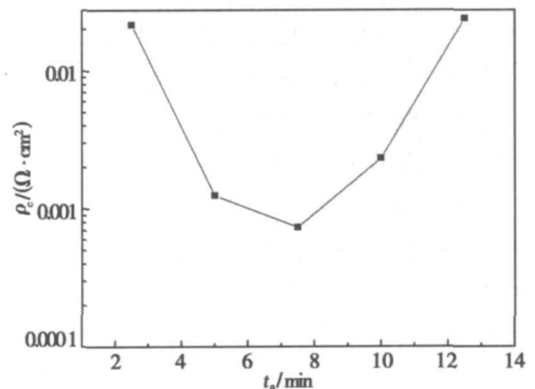


图 6 550 °C 温度下不同退火时间对比接触电阻的影响

由图 7 可知, 随着退火温度的增加其接触电阻逐渐降低, 当退火时间为 7.5 min 时比接触电阻可以达到 $7.32 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 效果最好。当退火时间再增加时, 有可能使 AZO 薄膜中的 O 与掺杂的 Al 结合, 使 Al 杂质载流子浓度和迁移率降低, 导致电学性能下降, 比接触电阻上升。

3 结论

本文介绍了 AZO/N⁺-Si 欧姆接触的制备方法, 并且通过实验分析了退火温度和时间对其比接触电阻的影响。实验表明在 550 °C、氮气氛围中退火 7.5 min 得到的比接触电阻最低, 为 $7.32 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 能满足器件性能要求, 可用于多晶硅太阳能电池的透明电极。

(下转第 391 页)

3.2 通信程序设计

要实现磁控溅射台的正常工作, PLC 需要和各个功能单元通信, 其中主要的是 PLC 和外部控制装置的通信。工业控制领域中, 控制系统广泛采用 RS485 通信方式, 与传统的模拟控制技术相比, 其连线大幅度减少、成本低、抗干扰力强、传输距离远。PLC 和外部控制装置通信设置正确后, 只需要通过 FROM 和 TO 命令监控衬底温度、反应室和冷泵的真空值。

3.2.1 PLC 侧通信设置

三菱 FX2N 系列 PLC 与外围控制装置串行通信, 采用 RS 串行通信指令编程。其通信程序设置如图 5 所示。

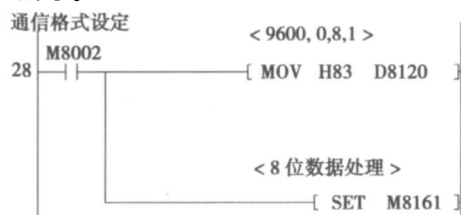


图 5 三菱 FX2N 系列 PLC 通信程序设置图

程序在起动时就写入 PLC, 数据传输波特率为 9600 b/s, 奇校验, 8 个数据位, 1 个停止位, 8 位数据处理方式^[2]。

3.2.2 温控仪表、复合真空计与 PLC 通信设置

温控仪表、复合真空计通信设置必须和 PLC 相

同, 主要包括波特率、校验、数据位和停止位。但地址不能相同, 否则要产生冲突, 不能通信。温控表地址是 01H, 复合真空计地址是 02H。温控仪表采用 RS485 的专用协议 MODBUS RTU, 复合真空计采用 RS485 无协议方式和 PLC 通信, PLC 主程序需要编写对应的收发数据、数据处理程序。

4 结束语

该设备通过触摸屏、PLC 及其功能模块对原电控系统进行改造后, 根据实际工艺情况, 加强了反应室自动真空准备功能、人性化操作界面, 准确控制镀膜溅射时间, 大大提高了薄膜的重复性和工艺稳定性, 为提高生产质量和效率提供了有利的条件。

参考文献:

- [1] Denton Vacuum Inc. DV-602RS DEPOSITION SYSTEM OPERATING MANUAL[Z]. 1993.
- [2] 三菱电机自动化(上海)有限公司. FX1S、FX1N、FX2N、FX2NC 编程手册——基本指令、步进梯形图指令、应用指令说明书[Z]. 2007.

作者简介:

赖忠良(1979-), 男, 2001 年毕业于四川轻化工学院应用电子专业, 工程师, 主要从事半导体设备维护维修工作。

E-mail: gkimkhnyvc@21cn.com

(上接第 388 页)

参考文献:

- [1] Burstein E. Anomalous optical absorption limit in InSb [J]. Phys. Rev., 1954, 93: 632.
- [2] Park K C, Ma D Y, Kim K H. The physical properties of Al doped zinc oxide films prepared by RF magnetron sputtering [J]. Thin solid films, 1997, 305: 201-204.
- [3] Song J O, Kim K K, Park S J, et al. Highly low resistance and transparent Ni/ZnO ohmic contacts to p-type GaN [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83 (3): 479-481.
- [4] Kluth O, Rech B, Houben L, et al. Texture etched ZnO: Al coated glass substrates for silicon based thin film solar cells [J]. Thin Solid Films, 1999, 351: 247-253.
- [5] Muller J, Rech B, Springer J, et al. TCO and light trapping in silicon thin film solar cells [J]. Sol. Energy, 2004, 77: 917-930.

- [6] Nakada T, Hirabayashi Y, Tokado T, et al. Novel device structure for Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells using transparent conducting oxide back and front contacts [J]. Sol. Energy, 2004, 77: 739-747.
- [7] Ibrahim A A, Ashour A. ZnO/Si solar cell fabricated by spray pyrolysis technique [J]. J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 2006, 17: 835-839.
- [8] Berger H H. Models for contacts to planar devices [J]. Solid State Electronics, 1972, 15: 145.
- [9] Crofton J, Porrtter L M, Williams J R. The physics of ohmic contacts of SiC [J]. Phys Status Solidi B, 1997, 201: 581.
- [10] 虞丽生. 半导体异质结物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 41.

作者简介:

杨倩(1986-), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 从事太阳能硅材料的研究。

E-mail: cchen@xmu.edu.cn